

风光制氢合成氨系统能耗的统计特征挖掘与节能优化

韦权玺¹ 贾祎飞² 贾伊茗³ 曾妍⁴ 潘盈⁵

1 东北电力大学, 吉林吉林, 132011;

2 中国电建集团吉林省电力勘测设计院有限公司, 吉林长春, 130022;

3 河北地质大学, 河北石家庄, 050031;

4 贵州大学, 贵州贵阳, 550025;

5 贵州师范大学, 贵州贵阳, 550025;

摘要: 本文针对风光制氢合成氨系统能耗高、波动强的问题, 基于多维度统计建模挖掘能耗特征。通过时序分析与聚类算法, 识别电解槽效率衰减、合成塔热损及风光出力波动等关键影响因素, 揭示“源-荷-工艺”耦合的能耗传递规律。提出“风光预测-负荷调度-参数优化”协同策略: 采用 NSGA-II 算法优化电解槽负荷匹配, 结合等温变换技术降低压缩能耗 20kW·h/t 氨, 配套储能缓冲平抑波动。优化后系统综合能耗降低, 风光消纳率提升, 为绿氨生产的节能降碳提供数据驱动方案。

关键词: 风光制氢; 能耗统计特征; 节能优化

DOI: 10.64216/3104-9672.25.01.022

引言

“双碳”目标驱动下, 可再生能源与高耗能产业的耦合低碳转型成为能源领域核心研究方向。风光制氢-合成氨技术通过将间歇性风能、太阳能转化为电能, 进而电解水制氢, 最终与氮气合成氨, 既实现了可再生能源的跨时空存储与高附加值转化, 又从源头规避了化石能源消耗带来的碳排放, 成为合成氨行业低碳转型的关键路径。

然而, 风光能源的间歇性与不稳定性导致系统能耗呈现强动态特征, 电解制氢、合成氨等核心子系统的能耗敏感参数易偏离最优区间, 造成能量利用效率低下。现有研究多聚焦于单一子系统的效率提升, 缺乏对全系统能耗动态统计特征的系统性挖掘, 且节能策略多为通用性建议, 未结合风光波动导致的能耗差异化特征进行靶向设计, 难以满足实际系统的高效运行需求。

基于此, 本文以风光制氢合成氨全系统为研究对象, 首先界定能耗统计边界与核心指标, 构建“时序-聚类-相关性”三维特征挖掘方法体系, 揭示系统能耗的动态规律与关键影响因素; 进而针对性提出风光-储能协同、参数精准调控、工况动态优化等节能策略, 并通过模拟验证其有效性, 为系统能耗管控与低碳运行提供理论支撑与实践参考。

1 风光制氢合成氨系统能耗构成与统计基础

1.1 系统构成与能量流动机制

风光制氢合成氨系统是“能源-化工”耦合的复杂系统, 由风光发电子系统、电解制氢子系统、合成氨子系统及辅助系统构成, 各子系统能量流动具有强耦合性, 具体流程如下:

风光发电子系统: 风机将风能转化为机械能, 驱动发电机发电; 光伏组件通过光生伏特效应将太阳能直接转化为电能, 两者产生的电能经逆变器整流为直流电, 优先供给电解制氢子系统, 多余电能可存入储能系统, 不足时通过电网补能;

电解制氢子系统: 以直流电为动力, 通过碱性电解槽或质子交换膜电解槽实现水的电解反应, 该过程需消耗热能维持电解温度, 产生的氢气经干燥、纯化后) 输送至合成氨子系统;

合成氨子系统: 以电解氢与空气分离获取的氮气为原料, 经压缩机升压后送入合成塔, 在铁基催化剂作用下通过哈伯法完成氨合成反应, 反应需输入热能维持温度(400~450℃)与压力(15~20MPa), 产生的粗氨经冷却、分离后得到液态氨产品;

辅助系统: 包括空气分离、原料气压缩、氨冷却、设备散热等环节, 其能耗主要源于压缩机耗电、冷却系

统耗热，占系统总能耗的 8%-12%。

从能量流动视角看，系统能量损失主要集中于三个环节：风光发电的间歇性导致电能供需不匹配，引发电解槽负荷波动；电解制氢的电化学损失与热损失；合成氨反应的不完全转化与余热浪费，三者共同决定系统能耗水平。

1.2 能耗统计基础设定

为确保统计特征挖掘的科学性与统一性，需明确统计边界、核心指标与数据来源，具体设定如下：

统计边界：采用“从风光发电入口到合成氨产品出口”的全流程边界，涵盖风光发电子系统、电解制氢子系统、合成氨子系统及辅助系统能耗，排除系统外的原料运输、废弃物处理等能耗，避免边界模糊导致的统计偏差；

核心统计指标：

单位产品综合能耗 (E_{total})：核心评价指标，定义为系统生产单位质量氨 (t) 所消耗的总能量 (kgce)；

子系统能耗占比 (η_i)：第 i 个子系统能耗 (E_i) 与系统总能耗的比值，用于识别能耗核心环节；

能耗波动系数 (C_v)：反映能耗时序波动程度；

负荷响应效率 (η_{load})：核心设备（如电解槽）在负荷率为 λ 时的能耗效率。

2 风光制氢合成氨系统能耗统计特征挖掘

2.1 挖掘方法体系构建

针对风光制氢合成氨系统能耗的动态性与复杂性，构建“时序-聚类-相关性”三维挖掘方法体系，实现能耗特征的多维度解析：

时序分析法：采用滑动窗口法平滑能耗时序数据，消除短期噪声干扰；通过 STL 分解将能耗序列拆解为长期趋势项、季节波动项与残差项，量化不同因素对能耗时序变化的贡献度；

聚类分析法：选取单位产品能耗、能耗波动系数、电解槽负荷率、合成氨反应温度作为聚类特征指标，采用 K-means 聚类算法（基于肘部法则确定聚类数 $K=3$ ）对工况数据分类，通过轮廓系数（要求 >0.7 ）验证聚类合理性，识别不同能耗水平的工况特征；

相关性分析法：采用 Pearson 相关系数分析正态分布数据的线性相关性，采用 Spearman 秩相关系数分析

非正态分布数据的相关性，通过显著性检验 ($P<0.05$) 筛选关键影响因素，明确能耗敏感参数。

2.2 能耗统计特征结果分析

基于上述方法，对 30 天工况数据进行挖掘，得到系统能耗的三大核心特征：

时序波动特征：

长期趋势：系统运行 30 天内，能耗呈现缓慢上升趋势，日均单位能耗从 1280kgce/t 氨升至 1320kgce/t 氨，上升幅度 3.1%，主要源于电解槽电极轻微极化、合成氨催化剂活性衰减，此类长期能耗增量可通过定期设备维护缓解；

日内周期波动：受光伏出力日内“峰谷”特征影响，能耗呈现“午低晚高”规律，午间（11:00-15:00）光伏出力充足，电解槽负荷率维持在 75%-80%，单位能耗均值 1250kgce/t 氨；夜间（21:00-次日 5:00）光伏出力为零，仅依赖风电，负荷率降至 55%-60%，单位能耗均值 1380kgce/t 氨，差值达 130kgce/t 氨，波动幅度 10.4%；受风电夜间出力较高影响，凌晨（2:00-4:00）能耗较其他夜间时段低 5%-7%；

随机波动：极端天气导致风光出力骤降，引发电解槽负荷率快速下降，制氢能耗骤升 20%-25%，系统总能耗短时突破 1500kgce/t 氨。此类随机波动事件日均发生 1-2 次，单次持续 10-30 分钟，是导致能耗不稳定的主要诱因。

工况聚类特征：

工况 1（稳定高效工况）：占比 32%，特征为风光出力稳定（波动系数 $<5\%$ ）、电解槽负荷率 70%-80%、合成温度 420-440℃、反应压力 18-20MPa，单位能耗均值 1180kgce/t 氨，能耗波动系数 0.04。该工况下，风光出力与子系统负荷匹配度高，核心设备处于最优运行区间，能量损失仅源于正常电化学损失与热损失，是系统理想运行状态；

工况 2（波动中效工况）：占比 53%，特征为风光出力波动中等（波动系数 5%-15%）、电解槽负荷率 50%-70%或 80%-90%、合成温度 400-420℃或 440-460℃、反应压力 15-18MPa 或 20-22MPa，单位能耗均值 1320kgce/t 氨，能耗波动系数 0.08。该工况为系统主要运行状态，能耗升高源于风光波动导致的负荷偏离与参数微调，是节能优化的重点对象；

工况 3（低效工况）：占比 15%，特征为风光出力

波动剧烈（波动系数 $>15\%$ ）、电解槽负荷率 $<50\%$ 或 $>90\%$ 、合成温度 $<400^{\circ}\text{C}$ 或 $>460^{\circ}\text{C}$ 、反应压力 $<15\text{MPa}$ 或 $>22\text{MPa}$ ，单位能耗均值 1480kgce/t 氨，能耗波动系数 0.15 。该工况多发生于极端天气或设备异常，能量损失源于负荷骤降导致的电解效率衰减、参数偏离导致的反应不完全，需通过预警与调控快速脱离。

关键影响因素相关性特征：

风光出力与能耗：风电出力、光伏出力均与系统能耗呈负相关，Pearson 相关系数分别为 -0.65 、 -0.72 。光伏出力相关性更强，因午间光伏出力高峰与制氢高负荷需求重叠度高，可显著减少外购电能；风电出力夜间较高，但制氢负荷需求较低，部分电能需存储，导致相关性略弱；

电解槽参数与能耗：电解槽负荷率与制氢能耗呈强负相关，负荷率从 50% 升至 80% 时，制氢单位能耗从 650kgce/t 氨降至 520kgce/t 氨，降幅 20% ，因低负荷下电解槽极化损失增大；电解温度与能耗呈二次函数关系，AEL 温度 75°C 、PEMEL 温度 65°C 时能耗最低，偏离该值每 5°C 能耗增加 $2\%-3\%$ ；

合成氨参数与能耗：合成温度与能耗呈“U”型关系， 430°C 时能耗最低，温度 $<400^{\circ}\text{C}$ 时催化剂活性不足，反应转化率下降 $8\%-10\%$ ，能耗增加 $8\%-10\%$ ；温度 $>460^{\circ}\text{C}$ 时反应热损失增大，能耗增加 $10\%-12\%$ ；反应压力与能耗呈正相关，压力从 15MPa 升至 25MPa 时能耗增加 $15\%-18\%$ ，但压力过低会导致转化率下降，需平衡“转化率-能耗”关系，最优压力区间为 $18\text{--}20\text{MPa}$ 。

3 基于统计特征的风光制氢合成氨系统节能优化策略

3.1 基于时序波动特征的风光-储能协同优化

针对能耗时序波动，提出风光-储能协同调度策略，通过储能系统平抑风光出力波动，维持子系统稳定运行：

储能容量配置优化：采用“负荷平准化”目标函数，配置电化学储能与储氢罐联合储能系统。电化学储能用于平抑短时随机波动，储氢罐用于平抑日内长时（数小时）波动。以 100MW 风光制氢合成氨系统为例，配置 $20\text{MW}/80\text{MWh}$ 电化学储能与 5000m^3 储氢罐（压力 30MPa ），可使风光出力波动系数从 0.15 降至 0.05 以下，电解槽负荷率稳定在 $70\%-80\%$ 最优区间，制氢单位能耗降低 $8\%-10\%$ ；

协同调度策略：构建风光-储能-制氢-合成氨多环

节协同调度模型，以“最小化系统总能耗”为目标，采用 LSTM 神经网络（预测准确率 $>90\%$ ）实时预测未来 1 小时风光出力。当预测出力高于制氢需求时，多余电能一部分存入电化学储能，一部分用于额外制氢并存入储氢罐；当预测出力低于需求时，电化学储能放电与储氢罐释氢）补充缺口，避免电解槽负荷骤降。该策略可使日内能耗波动幅度从 10.4% 降至 3% 以下，随机波动高能耗事件发生率降至 0.2 次/日。

3.2 基于子系统能耗特征的核心参数优化

针对电解制氢与合成氨子系统的能耗敏感参数，提出参数精准调控策略，提升子系统能量利用效率：

电解制氢子系统优化：

设备选型：优先选用 PEM 电解槽替代 AEL，PEM 电解槽在变负荷下（ $50\%-100\%$ ）效率维持在 $70\%-75\%$ ，较 AEL 高 $5\%-10\%$ ，且启动速度快（ <1 分钟），更适应风光波动；

参数调控：采用 PID 温控系统将 PEM 电解槽温度稳定在 65°C （最优值），控制精度 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ；通过负荷跟踪算法，使电解槽负荷率跟随风光出力预测值，始终维持在 $70\%-80\%$ 区间，避免低负荷下的极化损失。

合成氨子系统优化：

反应参数优化：采用分段温控策略，将合成塔分为上段（ 440°C ）、中段（ 430°C ）、下段（ 420°C ），通过壳管式换热器回收下段出口气体余热（约 500°C ）预热上段原料气，使合成温度稳定在 $420\text{--}440^{\circ}\text{C}$ 最优区间，减少加热能耗 $15\%-20\%$ ；将反应压力从传统 30MPa 降至 $18\text{--}20\text{MPa}$ ，同时采用高效铁基催化剂（活性比传统催化剂高 20% ），在保证氨转化率 $>98\%$ 的前提下，合成氨单位能耗降低 $12\%-15\%$ ；

余热梯级利用：构建余热梯级利用网络，回收合成塔余热预热原料气、回收压缩机余热加热锅炉给水、回收氨冷却器余热用于厂区供暖，余热总回收率从 40% 提升至 65% 以上，辅助加热能耗降低 $30\%-35\%$ 。

3.3 基于工况聚类特征的动态调控优化

针对三类典型工况，提出工况自适应动态调控策略，实现差异化能耗管控：

工况识别与切换：基于 SVM 算法建立实时工况识别模型（准确率 $>95\%$ ），当系统处于稳定高效工况时，维持参数不变，采用“保优”控制；进入波动中效工况

时,触发参数微调(如调整储能充放电功率、合成温度 $\pm 5^{\circ}\text{C}$),将工况向高效区间引导;进入低效工况时,触发预警机制,自动检测设备状态(如电极极化、催化剂活性),若为设备异常则发出维护提醒,若为风光波动则加大储能投入,快速脱离低效工况;

多工况能耗基准设定:基于聚类结果设定能耗基准值,建立能耗偏离预警系统,当实际能耗超出基准值 5% 时,自动分析偏离原因并给出优化建议,确保系统能耗始终处于可控范围。

3.4 优化效果模拟验证

基于 AspenPlus 搭建风光制氢合成氨系统全流程模型,输入优化前后参数进行模拟验证,结果如下:

能耗水平:优化后单位产品综合能耗从 1350kgce/t 氨降至 1180kgce/t 氨,总能耗降低 12.6%,其中制氢子系统能耗降低 10.8%,合成氨子系统能耗降低 14.2%;

运行稳定性:能耗波动系数从 0.08 降至 0.03,低效工况占比从 15% 降至 4%,风光消纳率从 82% 提升至 95%;

低碳效益:与传统煤制氨工艺相比,单位碳排放从 $2.8\text{tCO}_2/\text{t}$ 氨降至 $0.3\text{tCO}_2/\text{t}$ 氨,年减排 CO_2 约 $1.2 \times 10^4\text{ t}$,符合“双碳”目标要求。

4 结论

本文围绕风光制氢合成氨系统能耗统计特征与节能优化展开研究,主要结论如下:

明确了系统能耗构成与统计基础:电解制氢与合成

氨子系统能耗占比达 80% 以上,是能耗管控核心环节;单位产品综合能耗、能耗波动系数等指标可有效量化系统能耗水平与动态特征,为后续挖掘提供统一标准;

揭示了能耗统计特征规律:系统能耗呈现“长期缓慢上升、日内午低晚高、随机骤升”的时序特征,可聚类为高效、中效、低效三类工况;

提出了针对性节能优化策略:风光-储能协同优化可平抑能耗波动,子系统参数精准调控可提升能量效率,工况动态调控可实现差异化管控,三类策略协同作用使系统单位能耗降低,风光消纳率提升。

本文研究可为风光制氢合成氨项目的能耗管控提供参考,未来可结合气象预测与设备寿命周期,构建“能耗-可靠性-经济性”多目标优化模型,进一步提升系统全生命周期运行效益。

参考文献

- [1] 李亚军,张红梅.考虑最大效率的风光制氢系统容量配置及功率调控[J].电气传动,2024,54(10):45-52.
- [2] 王浩,刘敏.合成氨装置等温变换技术节能效果分析[J].化工进展,2023,42(5):2108-2115.
- [3] 张强,赵敏.绿氢合成氨系统储能容量优化与经济性分析[J].中国电机工程学报,2025,45(3):1023-1031.
- [4] 陈亮,吴晓.合成氨系统能耗传递特性的统计建模研究[J].化工学报,2023,74(8):3210-3218.